



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

Amaranth (*Amaranthus lividus* L.) drying using combined microwave-hot air dryer

รุกขชาติ ผลผาด^{1*} ณัฐพล ภูมิสะอาด² ละมุล วิเศษ³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

³ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Rukkachat Phonphard^{1*} Nattapol Poomsa-ad² Lamul Wiset³

¹ Faculty of Engineering, Maha Sarakham University Kantharawichai Maha Sarakham 44150

² Postharvest Technology and Agricultural Machinery Research Unit, Faculty of Engineering, Maha Sarakham University Kantharawichai Maha Sarakham 44150

³ Drying Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Maha Sarakham University Kantharawichai Maha Sarakham 44150

* Corresponding author.

E-mail: Rukkachat@ktc.ac.th; Telephone: 0 88562 0342

วันที่รับบทความ 2 มีนาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 มิถุนายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ 9 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่กำลังไมโครเวฟ 5 ระดับ ดังนี้ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส อบแห้งจนกระทั่งมีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าสี ค่าคลอโรฟิลล์ และค่าความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะ พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงโดยที่ กำลังไมโครเวฟ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์ ระยะเวลาการอบแห้งลดลงเป็น 8 4 3 2.5 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งไม่แตกต่างกัน ค่าความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ 11.03 - 12.62 ฐานเปียก ค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.48 - 0.57 สำหรับการวิเคราะห์ค่าสี พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเขียว (a*) มีแนวโน้มลดลง ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่กำลังไมโครเวฟ 500 และ 1,000 วัตต์ ปริมาณคลอโรฟิลล์มีค่าสูงกว่าที่ กำลังไมโครเวฟ 1,500 และ 2,000 วัตต์ ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าคลอโรฟิลล์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาคุณภาพและพลังงาน พบว่าการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ

ไมโครเวฟ ลมร้อน คลอโรฟิลล์ ผักโขม

Abstract

This research aimed to study the drying of Amaranthus by using combined microwave-hot air dryer. The microwave power at 5 levels, was 0 500 1,000 1,500 and 2,000 watts, in combination with hot air at 50 and 60°C, and drying until the water activity content was lower than 0.6. Then, the color values, chlorophyll value, and specific energy consumption were analyzed. The result showed that drying time decreased with increasing microwave power, i.e., at microwave power of 0, 500, 1000, 1,500, and 2,000 watts, drying took 8, 4, 3, 2.5, and 2 hours, respectively. The drying time of hot air at 50 and 60°C was not different. The final moisture content was in the range of 11.03 - 12.62 percent wet basis. The water

activity content was in the range of 0.48 - 0.57. The brightness (L^*) greenness (a^*) tended to decrease and yellowness (b^*) tended to increase with increasing microwave power and temperature. Chlorophyll values of drying at microwave powers of 500 and 1000 watts were higher than drying at microwave power of 1,500 and 2,000 watts. In addition, the chlorophyll values of drying at 50°C were higher than drying at 60°C. In terms of quality and energy, it was found that drying at 1,000 watts of microwave power combined with hot air at 50°C was the suitable condition.

Keywords

microwave; hot air; chlorophyll; amaranthus

1. บทนำ

ผักโขม (Amaranthus) เป็นผักพื้นบ้านที่พบขึ้นทั่วไปแทบทุกภาคของประเทศไทย ใช้เป็นอาหาร และสมุนไพร ส่วนที่นิยมนำมาปรุงอาหารคือยอดและใบ [1] ผักโขมเติบโตได้อย่างรวดเร็ว มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีทั้งโปรตีน วิตามิน กรดอะมิโน และแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งผักโขมยังแบ่งเป็นพันธุ์ต่าง ๆ ได้คือ ผักโขมสวน ผักโขมจีน ผักโขมหัด และผักโขมหวาน [2] โดยการจะเก็บรักษาพืชผักให้อยู่ได้นานและรักษาสรรพคุณต่าง ๆ ให้คงอยู่นั้นโดยทั่วไปนิยมนำมาแปรรูปด้วยวิธีการทำแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณค่าทางอาหารไว้ [3]

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น โดยการลดปริมาณน้ำอิสระ (Water activity) ให้ต่ำจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหาร วิธีการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพนั้นมักใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อให้แห้ง ซึ่งเป็นวิธีควบคุมการทำงานที่ง่ายและไม่ซับซ้อนแต่มีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพทางกายภาพ การสูญเสียสารอาหาร และสารออกฤทธิ์สำคัญต่าง ๆ [4] ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการอบแห้งโดยการนำเทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มาใช้ในการอบแห้งผลไม้และพืชผักทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย เช่น พริกทอง [5] ขนุน [6] พริก [7] ทูเรียนแผ่น [8] เป็นต้น การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนเพียงอย่างเดียว [9]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการอบแห้งผักโขมในสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ผักโขมปริมาณ 20 กรัม อบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 200 500 700 และ 1,000 วัตต์ ลมร้อนที่อุณหภูมิ

35 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าระดับกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิลมร้อนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [10] และยังมีการศึกษาการนำผักโขมอบแห้งมาเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและเพิ่มมูลค่า โดยการเติมผงผักโขมในบะหมี่แห้ง [11] และในคุกกี้เนย [3] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาคุณภาพของผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยการอบแห้งผักโขมที่ใช้ในปริมาณมากขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง และคุณภาพของตัวอย่างผักโขมหลังการอบแห้ง

2. เครื่องมือและวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวอย่างใบผักโขม

ปลูกผักโขมในพื้นที่เขตอำเภออมลาลาย จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยผักโขมใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตจนสามารถนำมาใช้ในการทดลองมี อายุ 30 วัน จึงทำการเก็บและเลือกส่วนใบ ที่มีขนาดความกว้าง 4 – 10 เซนติเมตร นำมาล้างน้ำให้สะอาด ผึ่งให้แห้งก่อนนำมาหาความชื้นเริ่มต้น

2.2 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

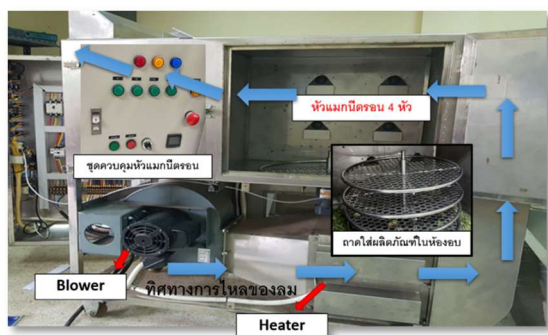
เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน สร้างขึ้นโดยบุคลากรในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ดังแสดงในรูปที่ 1 ห้องอบแห้งมีขนาด ยาว 60 เซนติเมตร กว้าง 60 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร ผนัง สแตนเลสผิวเรียบ ประกอบด้วยถาดหมุนภายในห้องอบ จำนวน 8 ชั้น มีแมกนีตรอนติดตั้งที่ผนังด้านหลังห้องอบ จำนวน 4 ตัว โดยแต่ละตัวให้กำลังสูงสุดได้ที่ 1,000 วัตต์ มีทางเข้าของอากาศด้านขวาและทางออกของอากาศทางด้านซ้ายของห้องอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยห้องทำความร้อนประกอบด้วยตัวทำความร้อนแบบแท่งขนาด 1

กิโลวัตต์ จำนวน 6 ตัว มีพัดลมชนิดเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แบบหน้าตัดโค้ง ขนาด 8 นิ้ว ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 0.5 แรงม้า



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

โครงสร้างภายในเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ คืออากาศภายนอกเครื่องอบแห้งจะถูกดูดด้วยพัดลม เข้าสู่อากาศเพื่อผ่านไปยังห้องทำความร้อนโดยฮีตเตอร์ ซึ่งมีจุดวัดความเร็วลมก่อนเข้าห้องทำความร้อน อากาศร้อนจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับฮีตเตอร์ตามอุณหภูมิความร้อนที่กำหนดในการอบแห้ง โดยจะวัดอุณหภูมิที่ห้องทำความร้อนโดยสายเทอร์โมคัปเปิลและอุณหภูมิอากาศจะวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าของห้องอบแห้งเพื่อส่งสัญญาณมายังชุดควบคุมเพื่อทำการตัดต่อการทำงานของตัวทำความร้อน พร้อมกันนี้แมกนีตรอนก็จะถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เพื่อสร้างคลื่นไมโครเวฟส่งเข้าไปในห้องอบแห้งทำงานพร้อมกับอากาศร้อนเพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยแมกนีตรอนจะถูกควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม Arduino



รูปที่ 2 ทิศทางการไหลเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

2.3 เงื่อนไขในการอบแห้ง

การอบแห้งผักโขม ใช้ผักโขม 2,000 กรัม (ถาดละ 286 กรัม) นำมาจัดเรียงบนจานใส่ตัวอย่างในตู้อบ ดังแสดงในรูปที่ 3 ความเร็วลมในห้องอบแห้งที่ 1 เมตร/วินาที โดยมีเงื่อนไขในการอบแห้ง คือ กำลังไมโครเวฟ 5 ระดับ ที่ 0, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส อบแห้งจนกระทั่งค่าวอเตอร์แอคทิวิตี น้อยกว่า 0.6 เพื่อชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย [12]



รูปที่ 3 ถาดใส่ตัวอย่างใบผักโขม

2.4 ระยะเวลาเปิด-ปิดหัวแมกนีตรอน

การควบคุมกระบวนการอบแห้งนั้นจะกำหนดระยะเวลาการเปิด-ปิดหัวแมกนีตรอนแบบคู่ทะแยง เพื่อเฉลี่ยให้ได้ค่ากำลังไมโครเวฟตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งที่หัวแมกนีตรอนแต่ละหัวมีกำลังไมโครเวฟ 1000 วัตต์ จึงกำหนดให้มีระยะเวลาการเปิด-ปิด เพื่อให้กำลังไมโครเวฟอยู่ในเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระยะเวลาการเปิด-ปิดแมกนีตรอนในการอบแห้ง

กำลังไมโครเวฟ (watt)	หัวแมกนีตรอน ตัวที่ 1 และ 4		หัวแมกนีตรอน ตัวที่ 2 และ 3	
	เปิด (s)	ปิด (s)	เปิด (s)	ปิด (s)
500	5	15	5	15
1,000	10	10	10	10
1,500	15	5	15	5
2,000	20	20	20	20

2.5 การวิเคราะห์ค่าความชื้น

ค่าความชื้น (Moisture content) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณ น้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุ ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ตาม มาตรฐาน AOAC [13] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_w คือ ร้อยละความชื้นฐานเปียก (% w.b.), w คือ มวลของวัสดุขึ้น (กรัม), d คือ มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

2.6 การวิเคราะห์ค่าสี

เตรียมตัวอย่างผักโขม โดยบดผักโขมอบแห้งด้วยเครื่องบดให้ละเอียด นำผงผักโขมใส่แก้วใสประมาณ 2/3 ของแก้ว จากนั้นนำตัวอย่างไปวางบนแท่นของเครื่องวัด และทำซ้ำตัวอย่างละ 5 ซ้ำ โดยใช้เครื่องวัดค่าสี รุ่น Color Flex EZ CFEZ0939 นำมาใช้ในการวัดค่าสีของผักโขมอบแห้งในระบบ CIE L* (ค่าความสว่างหรือความมืด) a* (ค่าสีแดงหรือสีเขียว) b* (ค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน)

2.7 การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์

การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ตามวิธีการของศุภชาติ ธรรมนิติ เวทย์ [14] ทำการตัดผักโขมให้เป็นชิ้นเล็กปริมาณ 100 มิลลิกรัม หลักเลี่ยงการใช้เนื้อเยื่อบริเวณเส้นใบและขอบใบ บดให้ละเอียด สกัดด้วย อะซิโตนปริมาตร 20 มิลลิลิตร จนเนื้อเยื่อเปลี่ยนเป็นสีขาวใส กรองกากออก ปรับปริมาตรของสารละลายด้วยอะซิโตนให้เท่ากับ 30 มิลลิลิตร จากนั้นหุ้มภาชนะบรรจุสารละลายคลอโรฟิลล์ด้วย ฟอยล์เพื่อป้องกันการสูญเสียคลอโรฟิลล์จากการโดนแสงนำสารละลายคลอโรฟิลล์ที่สกัดด้วยอะซิโตน ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวช่วงคลื่น 645 และ 663 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง spectrophotometer และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (a) คลอโรฟิลล์บี (b) และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 3 และ 4

$$CHL_a = [12.7(OD_{663}) - 2.69(OD_{645})] \times \frac{V}{1000xm} \quad (2)$$

$$CHL_b = [22.9(OD_{645}) - 4.68(OD_{663})] \times \frac{V}{1000xm} \quad (3)$$

$$CHL_{total} = [20.9(OD_{645}) + 8.02(OD_{663})] \times \frac{V}{1000xm} \quad (4)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของสารละลายที่ตรวจวัดคลอโรฟิลล์, m = น้ำหนักตัวอย่าง, OD = ค่าการดูดกลืนแสง

2.8 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5

$$SEC = \frac{3.6E}{(Wt - Wd)} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ), E คือ ปริมาตรพลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง), Wt คือ น้ำหนักผักโขมที่เวลาใด ๆ (กรัม), Wd คือ น้ำหนักแห้งของผักโขม (กรัม)

2.9 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยผลที่ได้ในการอบแห้งแต่ละครั้งจะแสดงในค่าเฉลี่ยซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ค่าเฉลี่ยจะพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ $p < 0.05$ โดยการทดสอบทางสถิตินี้คำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS (Version 25)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ ค่าความชื้น เวลาในการอบแห้งและปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ผักโขม

ตารางที่ 2 การเพิ่มขึ้นของกำลังไมโครเวฟส่งผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ

สามารถทะลุเข้าไปในตัวผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดความร้อนจากภายในและภายนอกพร้อมกัน ส่งผลให้ความชื้นสามารถเคลื่อนมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ และเกิดการระเหยของน้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mujaffar and Alex [10] ที่กำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลงที่อุณหภูมิร้อน 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสุดท้ายสูงกว่าอุณหภูมิร้อน 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ

อุณหภูมิร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นส่งผลให้ความชื้นเกิดการระเหยได้ดีขึ้น [15] โดยปริมาณน้ำอิสระที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่า 0.6 แสดงว่าสามารถชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย [12]

ตารางที่ 2 ความชื้น ระยะเวลาและปริมาณน้ำอิสระของผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ไมโครเวฟ (watt)	เวลา (hr)	ค่าความชื้นเริ่มต้น (% w.b)	ค่าความชื้นสุดท้าย (% w.b)	ค่า a_w
50	0	8	87.67±0.34	12.62±0.46	0.56±0.02
	500	4	86.32±0.25	12.35±0.41	0.55±0.02
	1,000	3	86.65±0.08	11.90±0.43	0.53±0.02
	1,500	2.5	87.39±0.11	11.77±0.36	0.53±0.01
	2,000	2	87.56±0.07	11.59±0.42	0.48±0.01
60	0	8	87.20±0.09	12.56±0.30	0.54±0.02
	500	4	86.98±0.35	12.50±0.51	0.51±0.01
	1,000	3	87.24±0.21	11.67±0.57	0.50±0.01
	1,500	2.5	87.42±0.15	11.37±0.50	0.47±0.01
	2,000	2	87.76±0.32	11.03±0.44	0.46±0.01

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของผักโขมอบแห้ง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบวัดค่าสีของผักโขมอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าทั้งกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี L^* a^* b^* เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่า L^* ลดลง เนื่องจากระดับกำลังไมโครเวฟเพิ่มทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เรียกว่าเมลลาร์ด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mujaffar and Alex [10] ที่กำลังไมโครเวฟเพิ่ม ขึ้น ค่า L^* ลดลง ที่อุณหภูมิร้อน 50 องศาเซลเซียส ค่า L^* ต่ำกว่าที่ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลลดลง ค่า a^* มีค่าเป็นลบแสดงความเป็นสีเขียว พบว่ากำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่า a^* ลดลง เนื่องจากกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจะให้พลังงานความร้อนสูงสามารถทำลายคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเขียวที่ไม่เสถียรต่อความร้อน และที่อุณหภูมิร้อน 50 องศาเซลเซียส ค่า a^* ต่ำกว่าที่ 60 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากการอบแห้งที่ใช้เวลานานสามารถทำให้คลอโรฟิลล์สลายได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Roshanak et al. [16] ที่พบว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ในระหว่างการทำแห้งเป็นเหตุผลหลักในการเสื่อมสลายของสี ในระหว่างการทำแห้ง ค่า b^* มีค่าเป็นบวกแสดงความเป็นสีเหลือง พบว่ากำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้คลอโรฟิลล์ซึ่งแสดงความเป็นสีเขียวลดลงและความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเมลลาร์ด ที่ทำให้ค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ รุ่งโรจน์ ตับกกลาง และคณะ [17] ที่กำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิสูงขึ้น ค่า b^* จะเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่า Hue angle ของผักโขมอบแห้งมีแนวโน้มลดลง อยู่ในช่วง 91.93 - 100.15 องศา มีค่าไปทางสีเขียวเหลือง และค่า Chroma มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 19.88 - 25.72 องศา และที่อุณหภูมิร้อนทั้งสองค่าส่งผลต่อค่า Hue angle ของผักโขมอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วงสีเขียว และค่า Chroma เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าผงผักโขมในท้องตลาดค่าสี $L^* a^* b^*$ มีค่า 50.38 -3.76 20.88 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าจากการทดลองที่สภาวะกำลังไมโครเวฟไม่เกิน 1,000 วัตต์ และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่า $L^* a^* b^*$ ใกล้เคียงกับท้องตลาด

ผลการทดสอบวัดค่าสีของผักโขมอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าทั้งกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี $L^* a^* b^*$ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสี $L^* a^* b^*$ Chroma และ Hue angle ของผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ไมโครเวฟ (watt)	L^*	a^*	b^*	Chroma	Hue angle
50	500	43.63±0.10 ^d	-2.90±0.04 ^e	19.46±0.04 ^g	19.88±0.22 ^g	98.35±0.06 ^d
	1,000	43.60±0.27 ^d	-2.55±0.11 ^d	22.10±0.04 ^e	22.36±0.14 ^e	96.30±0.10 ^e
	1,500	42.72±0.17 ^e	-1.63±0.21 ^c	22.56±0.03 ^d	22.76±0.14 ^d	95.03±0.83 ^e
	2,000	42.26±0.65 ^f	-0.79±0.05 ^b	22.89±0.05 ^d	22.94±0.06 ^d	90.94±0.06 ^g
60	0	46.74±0.47 ^a	-6.86±0.06 ⁱ	21.04±0.02 ^f	21.84±0.28 ^f	107.93±0.03 ^a
	500	46.71±0.28 ^a	-4.00±0.04 ^g	22.58±0.03 ^e	22.31±0.65 ^e	100.15±0.02 ^c
	1,000	46.11±0.92 ^b	-3.18±0.47 ^f	23.91±0.02 ^c	23.62±0.58 ^c	98.66±0.02 ^d
	1,500	43.42±0.62 ^c	-1.51±0.10 ^c	24.96±0.02 ^b	25.09±0.09 ^b	93.71±0.05 ^f
	2,000	43.68±0.02 ^d	-0.38±0.02 ^a	25.31±0.02 ^a	25.72±0.42 ^a	91.93±0.02 ^g
ผงผักโขมในท้องตลาด		50.38±0.04	-3.76±0.01	20.88±0.03	21.21±0.03	100.20±0.03

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันไปในแนวดิ่ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$)

3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมอบแห้ง

ตารางที่ 4 พบว่ากำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ สามารถรักษาปริมาณคลอโรฟิลล์ a b และคลอโรฟิลล์รวมได้ดีที่สุด เนื่องจากผักโขมอบแห้งที่ระดับกำลังไมโครเวฟสูงเกินไปทำให้ผักโขมยังได้รับความร้อนมากก็จะยิ่งทำให้สูญเสียปริมาณคลอโรฟิลล์มาก ซึ่งสอดคล้องกับที่กล่าวข้างต้นในเรื่องของสี

[16] ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คลอโรฟิลล์ a และ b มีค่าสูงกว่าที่ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นผลทำให้คลอโรฟิลล์เสื่อมสภาพ [18] จากการทดลองพบว่าที่เงื่อนไขอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงที่สุด

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ไมโครเวฟ (watt)	เวลา (hr)	คลอโรฟิลล์ a (mg/100g)	คลอโรฟิลล์ b (mg/100g)	คลอโรฟิลล์รวม (mg/100g)
50	0	8	3.23±0.03 ^d	0.87±0.11 ^a	4.16±0.07 ^{cd}
	500	4	3.54±0.01 ^c	0.47±0.05 ^b	4.07±0.04 ^d
	1,000	3	4.21±0.04 ^a	0.74±0.01 ^a	5.02±0.02 ^a
	1,500	2.5	2.57±0.09 ^f	0.44±0.03 ^b	3.05±0.06 ^g
	2,000	2	1.84±0.01 ^g	0.23±0.05 ^c	2.09±0.07 ⁱ
60	0	8	2.85±0.05 ^e	0.76±0.12 ^a	3.66±0.18 ^e
	500	4	3.42±0.04 ^c	0.83±0.04 ^a	4.32±0.08 ^c
	1,000	3	3.75±0.12 ^b	0.72±0.03 ^a	4.55±0.08 ^b
	1,500	2.5	2.81±0.04 ^e	0.46±0.06 ^b	3.32±0.11 ^f
	2,000	2	2.43±0.03 ^f	0.16±0.03 ^c	2.63±0.05 ^h

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวดิ่ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$)

3.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 5 แสดงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง พบว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 2,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งทั้งในส่วนของการพลังงานที่ใช้ในการอุ่นอากาศและพลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุวิทย์ แพงกันยา [8] ที่เพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟทำให้ความ

สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งการใช้พลังงานในการอุ่นอากาศและพลังงานไฟฟ้าลดลง เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้ฮีตเตอร์เป็นตัวทำความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมากที่สุดในระบบ แต่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนนั้นจะมีการใช้แมกนีตรอนเป็นตัวปล่อยคลื่นไมโครเวฟร่วม จึงทำให้การอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟสูงขึ้น ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้การใช้พลังงานลดน้อยลงด้วยเช่นกันและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง

ตารางที่ 5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

อุณหภูมิ (°C)	ไมโครเวฟ (watt)	เวลา (hr)	พลังงานที่ใช้ (kWh)				น้ำที่ระเหย (g)	SEC (MJ/Kg)
			Microwave	Blower	Heater	Total		
50	0	8	0	0.72	120.53	121.25	1,753.75	0.249
	500	4	2	0.36	60.27	62.63	1,727.72	0.131
	1,000	3	3	0.27	45.20	48.47	1,733.64	0.101
	1,500	2.5	3.76	0.23	37.67	41.65	1,750.23	0.086
	2,000	2	4	0.18	30.13	34.31	1,751.72	0.071
60	0	8	0	0.72	129.60	130.32	1,744.43	0.269
	500	4	2	0.36	64.80	67.16	1,740.03	0.139
	1,000	3	3	0.27	48.60	51.87	1,745.18	0.107
	1,500	2.5	3.76	0.23	40.50	44.48	1,749.34	0.092
	2,000	2	4	0.18	32.40	36.58	1,755.72	0.075

4. บทสรุป

จากการทดลองอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้กำลังไมโครเวฟสูงขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง ผักโขมอบแห้งเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟมีค่าความสว่างและค่าสีเขียวลดลง มีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าคลอโรฟิลล์ลดลง และที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่าง ค่าสีเขียว และค่าสีเหลืองต่ำกว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าคลอโรฟิลล์ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส สำหรับเงื่อนไขที่แนะนำในการอบแห้งผักโขม คืออบแห้งด้วยไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศา

เซลเซียส มีค่าคลอโรฟิลล์สูงที่สุดและมีความเหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาในแง่ของคุณภาพและพลังงาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนการนำเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มาทดลองในงานวิจัยและส่งเสริมการจัดทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เตชา ศิริภัทร. ผักขม:ความขมที่เป็นทั้งผักและยา. เข้าถึงได้จาก : www.doctor.or.th/article/detail/3913 [เข้าถึงเมื่อ 21 กันยายน 2563]

- [2] สุธาทิพ ภมรประวดี. มุลนิธิหมอบ้านเรื่องผักขม. เข้าถึงได้จาก : www.doctor.or.th/article/detail/4092 [เข้าถึงเมื่อ 21 กันยายน 2563]
- [3] จุริมาศ ดีอำมาตย์, นฤมล บุญประสิทธิ์, ชุตินา แยมขมสวน, สุฤทัย อธิอักษร. การเสริมคุณค่าทางโภชนาการโดยใช้ผงผักโขมในคุกกี้เนย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดร*. 2556; 6(2): 43-52.
- [4] สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. *การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ*. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อปจำกัด; 2555.
- [5] นันทวัน เทิดไทย, สุพิชา กระจำนเมธิกุล. ผลของการใช้ไมโครเวฟร่วมแบบลมร้อนต่อคุณภาพของผักทองอบแห้ง. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 กรุงเทพฯ 1-4 กุมภาพันธ์ 2554*. 2554. หน้า 133-140.
- [6] สุภวรรณ ภูริวงนิชัยกุล, สากิโน ลาแมปะ, ยุทธนา ภูริวงนิชัยกุล. การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์ คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 2556; 17(1): 117-129.
- [7] ธราวุธ บุญน้อม, สาวิตรี ประภาการ, ณัฐพงษ์ ประภาการ, พรธชา ลิบลับ, วีรชัย อาจหาญ. การศึกษากระบวนการผลิตพริกแห้งโดยใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ระดับต้นแบบ. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*. 2561; 24(1): 38-46.
- [8] สุวิทย์ แพงกันยา, อติศักดิ์ นาถกรณกุล, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัย ขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*. 2558; 46(4): 102-111.
- [9] เทวรัตน์ ทิพย์วิม, สมยศ เชื้ออักษร. การอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. *วารสารวิชาการเกษตร*. 2550; 25(1): 46-57.
- [10] Mujaffar S, Alex L. The Rehydration Behavior of Microwave-Dried Amaranth (*Amaranthus Dubius*) Leaves. *Food Science & Nutrition*. 2016; 3(5): 399-406.
- [11] นฤมล พงษ์รามัญ, สิรินันท์ พันภัย, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์. ผลของการเติมผักโขมผงต่อคุณภาพของบะหมี่แห้ง. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*. 2554; 42(2)(พิเศษ): 477-480.
- [12] รุ่งภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. Water Activity กับการควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร. เข้าถึงได้จาก : www.playsotec.com/17390808/water-activity/ [เข้าถึงเมื่อ 21 กันยายน 2563]
- [13] AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of AOAC International. 17th ed., Maryland, USA.
- [14] ศุภชาติ ธรรมนิติเวทย์. การสกัดสารสีจากใบพีชสำหรับใช้ในการศึกษาทางสรีรวิทยาของพีช. *วารสารเกษตรนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก*. 2562; 16(1): 73-81.
- [15] ณัฐพล กระจำน. *การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด [วิทยานิพนธ์]*. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา. 2560.
- [16] Roshanak S, Rahimmalek M, Goli S. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves. *Journal of Food Science and Technology*. 2016; 53(1): 721-729.
- [17] บุญทริกา สุมะนา, วรรณศิริ หิรัญเกิด. ผลของอุณหภูมิและเวลาทำแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กระท่อนแช่อิ่มอบแห้ง. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก*. 2564; 14(1): 155-163.
- [18] วลีส ภาคพจน์, ลลิตา ศิริวัฒนานนท์, นวพร ลากส่งผล, อินทิรา ลิจันทรพร. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเปลือกมะม่วงผง. *การประชุมวิชาการเสนองานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 มหาวิทยาลัย ขอนแก่น 15 มีนาคม 2562*. 2562. หน้า 662-672.